

УДК 539.3

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ И КВАЗИСТАТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПАКЕТОВ ПЛЕТЕННЫХ СЕТОК\*

© 2016 г.

**Брагов А.М., Константинов А.Ю.,  
Кочетков А.В., Модин И.А.**

*Научно-исследовательский институт механики  
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород, Российская Федерация*

kochetkov@mech.unn.ru

*Поступила в редакцию 20.06.2016*

Проведены экспериментальные исследования деформационных и прочностных свойств конструктивно ортотропных пакетов плетеных металлических сеток при статическом и динамическом нагружении. Для ударного растяжения в плоскости слоев сетки использовался аналог схемы Николаса, представляющей собой модификацию метода Кольского. В разрезных стержнях Гопкинсона сделаны продольные пазы, в которых размещается и закрепляется испытываемый образец. Ударное растяжение проводится в волне растяжения, формирующейся в стержнях в результате отражения от свободного торца ударника первичной волны сжатия, которая проходит через стык стержней, не деформируя образец. Показано, что диаграммы деформирования при растяжении в плоскости слоев и при сжатии по нормали к слоям сетки при всех режимах нагружения нелинейны, при деформации пакетов сеток проявляются пластические свойства. На квазистатическое растяжение пакетов сеток существенное влияние оказывает их предварительное обжатие. При динамическом растяжении этот эффект выражен значительно слабее.

*Ключевые слова:* тканая металлическая сетка, эксперимент, разрезной стержень Гопкинсона, динамическая деформация, прочность, пакет сеток.

### **Введение**

Одна из важных прикладных задач состоит в разработке и анализе поведения различного рода защитных конструкций, работающих в условиях ударного и взрывного нагружения [1–6]. Перспективным демпфирующим элементом, защищающим конструкции от ударных и взрывных воздействий, являются пакеты из металлических плетеных сеток [7–10]. Для проектирования демпфирующих элементов необходимо знать их деформационные и прочностные свойства. По своему конструк-

---

\* Выполнено при финансовой поддержке РФФИ (гранты №14-08-00197, №15-38-20759 мол\_a\_вед, №16-08-00458), РНФ (грант №15-19-10032 в части результатов динамических испытаний на растяжение) и Программой поддержки ведущих научных школ РФ (грант НШ-6944.2016.8).

тивному строению пакеты сеток представляют собой ортотропный элемент, имеющий различные деформационные свойства в направлениях по нормали к слоям сетки и в плоскости слоев сетки. В [9, 11, 12] приведены результаты экспериментальных исследований деформационных свойств пакетов сеток в квазистатическом режиме нагружения. Далее приводятся новые результаты экспериментальных исследований при динамическом и квазистатическом нагружении.

### 1. Методика динамических испытаний

Экспериментальные исследования динамических свойств проводились на экспериментальной установке с разрезными стержнями Гопкинсона [13–15]. Образцы изготавливались из двух типов сеток НУ ГОСТ 3826-82:  $2 \times 2 \times 0,5$  и  $3,2 \times 3,2 \times 0,8$  мм (первые два числа – шаг плетения, последнее число – диаметр проволоки). При сжатии по нормали к слоям сетки испытания проведены для двух видов образцов: кругового сечения диаметром 20 мм и квадратного сечения со стороной 50 мм. Испытывались образцы, состоящие из 10 и 20 слоев сетки, наложенных друг на друга. Направления нитей были одинаковы для всех слоев. Образец помещался между двумя мерными стержнями. Один из стержней нагружался ударом короткого стержня-ударника, движущегося со скоростью  $V_0$ . При этом в стержне формировался прямоугольный импульс сжатия, который нагружал образец. В процессе эксперимента с помощью тензодатчиков регистрировались деформации в сечениях нагружающего и опорного мерного стержней. По этой информации с помощью формул Кольского [15] рассчитывалась временная история изменения длины образца, а также действующая на него при этом сила.

Для испытания пакета сеток в условиях ударного растяжения в плоскости слоев использовался аналог схемы Николаса [16], представляющей собой модификацию метода Кольского. Схема эксперимента показана на рис. 1.

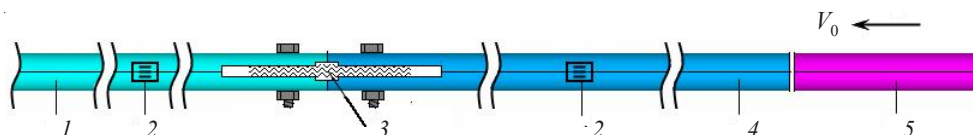


Рис. 1

На рисунке обозначено: 1 – опорный стержень, 2 – тензодатчики, 3 – образец, 4 – нагружающий стержень, 5 – ударник. Плоский образец, предварительно обжатый по нормали к слоям сетки, закрепляется в вилках мерных стержней с помощью болтовой стяжки. Торцы стержней при этом стыкуются. Система нагружается ударником, разогнанным в пневматической пушке. Сформировавшийся при этом сжимающий импульс проходит через стык, не деформируя образец. Отражаясь от свободного торца стержня 1, этот импульс меняет знак и превращается в импульс растяжения, который движется в сторону образца и нагружает его. Регистрация деформации в тензодатчиках 2 позволяет рассчитать деформацию образца и силу, которая действовала на образец в процессе нагружения. Используемая в экспериментах установка состояла из дюралевых мерных стержней 1, 4 диаметром 30 мм.

## 2. Результаты динамических испытаний на сжатие

Скорость деформации в экспериментах изменялась в пределах  $1500\text{--}3500\text{ с}^{-1}$ . Нагружение проводилось стальным ударником длиной 300 мм. Начальная скорость ударника для каждого испытания фиксировалась. Деформирование образца проходило в несколько циклов, связанных с распространением волн сжатия и растяжения в стержнях. На рис. 2 сплошными линиями показаны диаграммы деформирования образцов при сжатии по нормали к слоям сеток, имеющие участки активного нагружения и разгрузки (1 – сетка  $2\times 2\times 0,5$  мм, образец из 10 слоев; 2 – сетка  $2\times 2\times 0,5$  мм, образец из 20 слоев; 3 – сетка  $3,2\times 3,2\times 0,8$  мм, образец из 10 слоев; 4 – сетка  $3,2\times 3,2\times 0,8$  мм, образец из 20 слоев). Здесь и далее в качестве меры деформации принимается логарифмическая деформация.

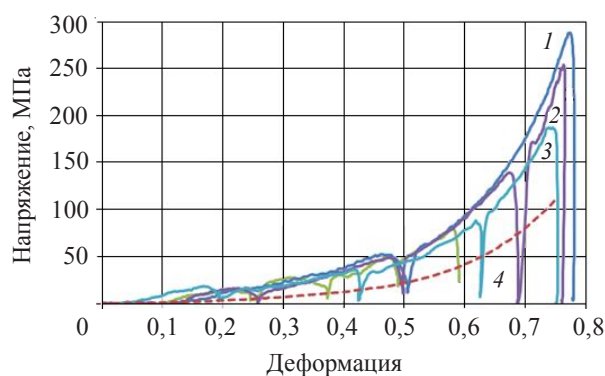


Рис. 2

Видно, что деформирование при активном нагружении имеет ярко выраженный нелинейный характер, в то время как разгрузочные ветви близки к прямым линиям. Разгрузочный модуль  $E_r$  в проведенных испытаниях изменялся от 19 ГПа до 26 ГПа. Кривые деформирования слабо зависят от количества слоев и типа рассматриваемых сеток. Полученные при активном нагружении динамические кривые деформирования располагаются значительно выше статической кривой (на рис. 2 результаты статических испытаний [11] обозначены штриховой линией), что свидетельствует о ярко выраженной скоростной зависимости деформационных характеристик плетеных сеток.

## 3. Результаты динамических испытаний на растяжение

При испытаниях на растяжение в плоскости слоев сетки вдоль направления нитей испытывался пакет из 10 слоев сетки  $2\times 2\times 0,5$  мм, размеры образца  $110\times 20$  мм. Толщина образца варьировалась в зависимости от предварительного обжатия. Длина рабочей части образца равна 14 мм. На рис. 3 приведен начальный вид образца и образца, разрушенного в процессе ударного растяжения.

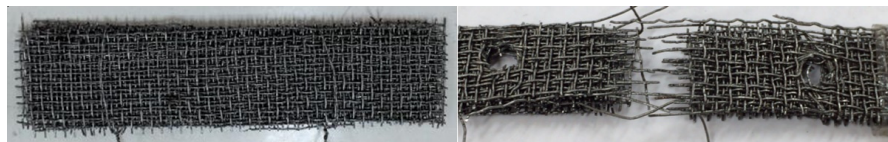


Рис. 3

На рис. 4 показаны усредненные по нескольким опытам диаграммы на растяжение при различных напряжениях предварительного обжатия по нормали  $\sigma_{сж}$ . Кривая 1 получена при  $\sigma_{сж} = 37,5$  МПа, кривая 2 – при  $\sigma_{сж} = 100$  МПа, кривая 3 – при  $\sigma_{сж} = 150$  МПа, кривая 4 – при  $\sigma_{сж} = 200$  МПа. Результаты проведенного исследования не выявили существенного влияния предварительного обжатия в исследуемом диапазоне, поскольку разброс полученных кривых деформирования не превышает разброса кривых, полученных в одинаковых условиях.

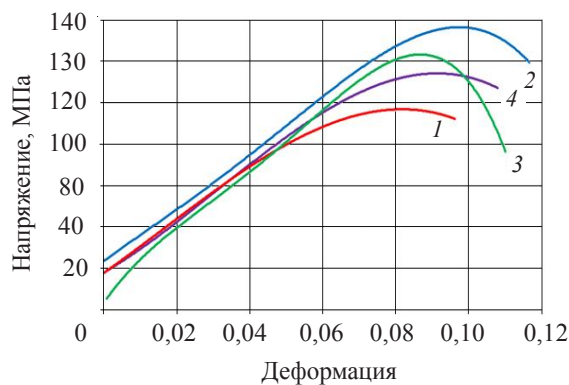


Рис. 4

#### 4. Результаты статических испытаний на растяжение

Статические испытания проводились на пакете, состоящем из 10 слоев. Размер образца, шаг ячейки и диаметр сечения проволоки такой же, как и при динамических испытаниях на растяжение. С целью анализа влияния базы (рабочей части образца) на зависимость напряжения от деформации были проведены испытания с базами длиной 2, 5, 7, 10, 14, 20 мм. Для образцов с базой до 7 мм в силу дискретности пакета обнаружилось заметное отличие в кривых деформирования. Дальнейшие экспериментальные исследования были проведены при длине рабочей части образца 14 мм, что соответствовало условиям проведения динамических испытаний. Образцы, предварительно обжатые до напряжений: 1 –  $\sigma_{сж} = 0$  МПа, 2 –  $\sigma_{сж} = 5$  МПа, 3 –  $\sigma_{сж} = 25$  МПа, 4 –  $\sigma_{сж} = 50$  МПа, 5 –  $\sigma_{сж} = 150$  МПа, устанавливались в захваты сервогидравлической машины Zwick Z030 [17] и растягивались. Результаты испытаний приведены на рис. 5.

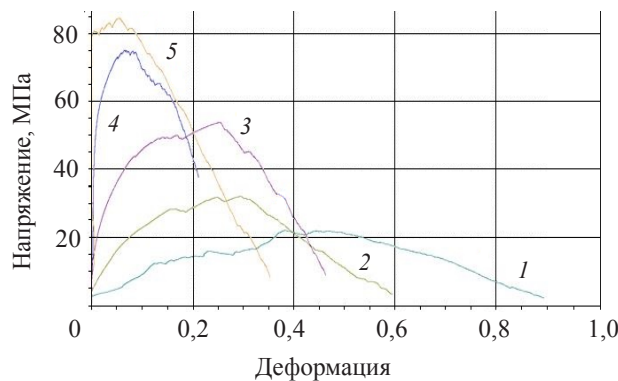


Рис. 5

Для одного из образцов при  $\sigma_{сж} = 45$  МПа программа испытаний включала поэтапные нагружения и разгрузки, показанные на рис. 6.

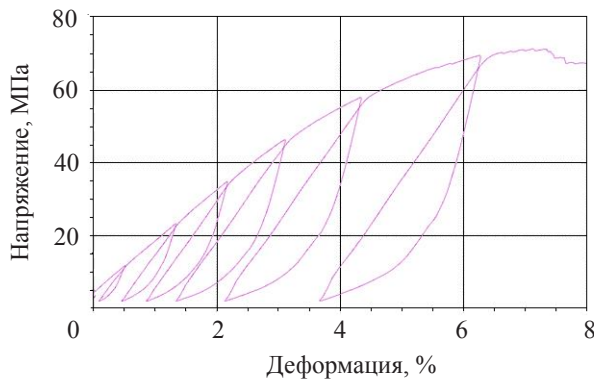


Рис. 6

Пакеты сеток, как и в случае испытаний на сжатие по нормали [11], проявляют при растяжении вдоль нитей нелинейные свойства и испытывают необратимые деформации. По сравнению с динамическими испытаниями квазистатическое деформирование пакетов сеток при растяжении обнаруживает существенную зависимость от степени предварительного обжатия и имеет более выраженный нелинейный характер.

### Заключение

По результатам динамических испытаний образцов многослойных пакетов плетеных металлических сеток на сжатие по нормали к слоям и на растяжение в плоскости слоев вдоль нитей получены кривые деформирования вплоть до разрушения образцов. Кривые на растяжение и на сжатие при всех режимах нагружения имеют нелинейный и необратимый характер, при деформации пакетов сеток проявляются пластические свойства. На квазистатическое растяжение пакетов сеток существенное влияние оказывает их предварительное обжатие.

Выражаем благодарность за помощь в проведении статических экспериментов заведующему лабораторией НИИ механики ННГУ Д.А. Казакову, старшим научным сотрудникам А.Н. Горохову и М.Ю. Втюрину.

### Список литературы

1. Stolz A., Ruiz-Ripoll M.L. Experimental and computational characterization of dynamic loading and structural resistance of tunnels in blast scenarios. *Fire Technology*. 2015. 24 p. DOI:10.1007/s10694-015-0496-8.
2. Chacko S., Jones A., Brooks R., Lidgett M.J. An inverse estimation of high strain rate properties of composite material constituents. *20th Intern. Conf. on Composite Materials*. 19–24 July, 2015. Copenhagen.
3. Splichal J., Pistek A., Hlinka J. Dynamic tests of composite panels of an aircraft wing. *Progress in Aerospace Sciences*. 2015. No 6. DOI:10.1016/j.paerosci.2015.05.005.
4. Cadoni E., Forni D. Strain rate effects on reinforcing steels in tension. *EPJ Web of Conference* 94. 01004. 2015. DOI:http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20159401004.
5. Zhu H., Pierron F. Exploration of Saint-Venant's principle in inertial high strain rate testing of materials. *Experimental Mechanics*. 2015. No 7. DOI:10.1007/s11340-015-0078-1.

6. Dayong Hu, Kangpei Meng, Hanlin Jiang. Experimental investigation of dynamic properties of AerMet 100 Steel. *Procedia Engineering*. 2015. No 12. P. 1459–1464. DOI:10.1016/j.proeng.2014.12.685.
7. Альтшулер Л.В., Кругликов Б.С. Затухание сильных ударных волн в двухфазных и гетерогенных средах. *Прикладная математика и техническая физика*. 1984. №5. С. 24–29.
8. Кругликов Б.С., Кутушев А.Г. Ослабление ударных волн экранирующими решетками. *Физика горения и взрыва*. 1998. Т. 24, №1. С. 115–118.
9. Абакумов А.И. и др. Численная модель деформирования противоосколочной сетки при взрывном нагружении. *Тр. ВНИИЭФ. Математическое моделирование физических процессов*. 2006. №10. С. 16–30.
10. Абузьяров М.Х., Глазова Е.Г., Кочетков А.В., Крылов С.В., Романов В.И., Сырунин М.А. Моделирование взаимодействия ударных волн с деформируемыми газопроницаемыми преградами. *Проблемы прочности и пластичности*. 2010. Вып. 72. С. 120–129.
11. Горохов А.Н., Казаков Д.А., Кочетков А.В., Модин И.А., Романов В.И. Исследование деформационных свойств пакетов плетеных металлических сеток при квазистатическом сжатии и растяжении. *Проблемы прочности и пластичности*. 2014. Вып. 76. Ч. 3. С. 251–255.
12. Берендеев Н.Н., Кожанов Д.А., Любимов А.К. Структурная модель гибкого тканого композита. *Проблемы прочности и пластичности*. 2015. Т. 77, №2. С. 251–255.
13. Ledford N., Paul H., Ganzenmüller G., May M., Höfemann M., Otto M., Petrinic N. Investigations on specimen design and mounting for split Hopkinson tension bar (SHTB) experiments. *DYMAT*. 2015. No 9.
14. Sasikumar A., Pushpagiri N.J.S., Koithara L.L. Design and computational validation of a split Hopkinson pressure bar for dynamic characterization of materials under high strain rate tension loading. *Int. J. of Engineering Research & Technology*. 2015. Vol. 4. Is. 06. DOI: <http://dx.doi.org/10.17577/IJERTV4IS060894>.
15. Bragov A.M., Lomunov A.K. Methodological aspects of studying dynamic material properties using the Kolsky method. *Int. J. of Impact Engineering*. 1995. V. 16, No 2. P. 321–330.
16. Nicholas O. Tensile testing of materials at high rates of strain. *Experimental Mechanics*. 1981. V. 21, No 5. P. 177–195.
17. Волков И.А., Казаков Д.А., Коротких Ю.Г., Волков А.И. Методика определения параметров уравнений механики поврежденной среды при усталости и ползучести. *Прикладная механика и технологии машиностроения*. 2012. №2(21). С. 7–24.

#### References

1. Stolz A., Ruiz-Ripoll M.L. Experimental and computational characterization of dynamic loading and structural resistance of tunnels in blast scenarios. *Fire Technology*. 2015. 24 p. DOI:10.1007/s10694-015-0496-8.
2. Chacko S., Jones A., Brooks R., Lidgett M.J. An inverse estimation of high strain rate properties of composite material constituents. *20th Intern. Conf. on Composite Materials*. 19–24 July, 2015. Copenhagen.
3. Splichal J., Pistek A., Hlinka J. Dynamic tests of composite panels of an aircraft wing. *Progress in Aerospace Sciences*. 2015. No 6. DOI:10.1016/j.paerosci.2015.05.005.
4. Cadoni E., Forni D. Strain rate effects on reinforcing steels in tension. *EPJ Web of Conference* 94. 01004. 2015. DOI:<http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20159401004>.
5. Zhu H., Pierron F. Exploration of Saint-Venant's principle in inertial high strain rate testing of materials. *Experimental Mechanics*. 2015. No 7. DOI:10.1007/s11340-015-0078-1.
6. Dayong Hu, Kangpei Meng, Hanlin Jiang. Experimental investigation of dynamic properties of AerMet 100 Steel. *Procedia Engineering*. 2015. No 12. P. 1459–1464. DOI:10.1016/j.proeng.2014.12.685.
7. Al'tshuler L.V., Kruglikov B.S. Zatukhanie sil'nykh udarnykh voln v dvukhfaznykh i geterogennykh sredakh. *Prikladnaya matematika i tekhnicheskaya fizika*. 1984. №5. S. 24–29.
8. Kruglikov B.S., Kutushev A.G. Oslablenie udarnykh voln ekraniruyushchimi reshetkami. *Fizika gorennya i vzryva*. 1998. T. 24, №1. S. C. 115–118.

9. Abakumov A.I. i dr. Chislennaya model' deformirovaniya protivoo skolochnoy setki pri vzryvnom nagruzhenii. *Tr. VNIIEF. Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov*. 2006. №10. S. 16–30.
10. Abuzyarov M.Kh., Glazova E.G., Kochetkov A.V., Krylov S.V., Romanov V.I., Syrunin M.A. Modelirovanie vzaimodeystviya udarnykh voln s deformiruemyimi gazopronitsaemyimi pregradami. *Problemy prochnosti i plastichnosti*. 2010. Vyp. 72. S. 120–129.
11. Gorokhov A.N., Kazakov D.A., Kochetkov A.V., Modin I.A., Romanov V.I. Issledovanie deformatsionnykh svoystv paketov pletenykh metallicheskikh setok pri kvazistaticheskome szhatii i rastyazhenii. *Problemy prochnosti i plastichnosti*. 2014. Vyp. 76. Ch. 3. S. 251–255.
12. Berendeev N.N., Kozhanov D.A., Lyubimov A.K. Strukturnaya model' gibkogo tkanogo kompozita. *Problemy prochnosti i plastichnosti*. 2015. T. 77, №2. S. 251–255.
13. Ledford N., Paul H., Ganzenmüller G., May M., Höfemann M., Otto M., Petrinic N. Investigations on specimen design and mounting for split Hopkinson tension bar (SHTB) experiments. *DYMAT*. 2015. No 9.
14. Sasikumar A., Pushpagiri N.J.S., Koithara L.L. Design and computational validation of a split Hopkinson pressure bar for dynamic characterization of materials under high strain rate tension loading. *Int. J. of Engineering Research & Technology*. 2015. Vol. 4. Is. 06. DOI: <http://dx.doi.org/10.17577/IJERTV4IS060894>.
15. Bragov A.M., Lomunov A.K. Methodological aspects of studying dynamic material properties using the Kolsky method. *Int. J. of Impact Engineering*. 1995. V. 16, No 2. P. 321–330.
16. Nicholas O. Tensile testing of materials at high rates of strain. *Experimental Mechanics*. 1981. V. 21, No 5. P. 177–195.
17. Volkov I.A., Kazakov D.A., Korotkikh Yu.G., Volkov A.I. Metodika opredeleniya parametrov uravneniy mekhaniki povrezhdennoy sredy pri ustalosti i polzuchesti. *Prikladnaya mekhanika i tekhnologii mashinostroeniya*. 2012. №2(21). S. 7–24.

#### EXPERIMENTALLY INVESTIGATING DYNAMIC DEFORMATIONAL AND STRENGTH PROPERTIES OF WOVEN GRID PACKAGES

**Bragov A.M., Konstantinov A.Yu., Kochetkov A.V., Modin I.A.**

*Research Institute of Mechanics University of Nizhni Novgorod,  
Nizhni Novgorod, Russian Federation*

Deformational and strength properties of structurally orthotropic packages of woven metallic grids under static and dynamic loading are experimentally investigated. To apply impact tension in the plane of the layers, an analogue of Nicholas scheme, a modification of Kolsky method, was used. The split Hopkinson bars used feature longitudinal grooves in which a tested specimen is placed and secured. Impact tension is applied with a tensile wave formed in the bars as a result of the reflection of the primary compression wave from the free end of the striker, which (the wave) passes across the interface between the bars without deforming the specimen. It is found that curves of tension in the plane of the layers and curves of compression normal to the layers have a linear character for all loading regimes, and deformation of grid packages reveals plastic properties. Quasi-static tension behavior of grid packages is substantially affected by their presetting. In dynamic tension, this effect is considerably less pronounced.

*Keywords:* woven metallic grid, experiment, Hopkinson split bar, dynamic deformation, strength, grid package.